

# 地下水流れと汚染物質の 輸送・物質変換 シミュレーション

吉田 愛 (株)親和テクノ

池内章雄 佐賀大学大学院博士前期課程

荒木宏之 佐賀大学低平地防災研究センター

古賀憲一 佐賀大学理工学部都市工学科

W. Liengcharernsit | タイ・カセサート大学工学部環境工学科

## 1. はじめに

米国シリコンバレーにおける地下水汚染問題の発生を契機として、国内においては平成元年度に「水質汚濁防止法の改正」が行われ、各都道府県において地下水質の常時監視・有害物質の地下浸透禁止が義務づけられた。また、平成8年度には、都道府県知事が汚染原因者に対して地下水の水質汚染浄化のための措置を命ずることができる等の内容が定められ、更に、平成9年度には、「地下水質環境基準」(23項目)が設定された。

一方、低平地における地下水の利用は、我が国のみならずバンコク、オランダなど諸外国でも盛んである。それに伴い地下水の塩水化、地盤沈下などが問題となっており、更には、硝酸性窒素、種々の化学物質による地下水汚染が顕在化している。このような状況から世界的に見ても汚染された地下水・地盤環境再生のための様々な取り

組みがなされている。

地下水汚染に対して効果的な対策を講じるためには、汚染源の特定、対策効果の予測などが重要である。そのためには、現地調査もさることながら、有力な解析手法としての地下水汚染シミュレーションが必要不可欠である。すなわち、汚染源の特定及び汚染の動態を3次元的に把握する必要がある。複雑な地質・水理条件下で地下水流れと汚染物質の動態を再現できる数値モデルの開発が急務の課題である。

本研究では、地下水汚染の予測、汚染修復効果の予測、地下水利用、地下水の塩水化問題等の地下水に関する種々の課題を検討するためのシミュレーションモデルの構築を最終目的として、基準値を大きく超える汚染が明らかになり、実測データも比較的揃っている汚染サイト(以下、対象地域)を対象に地下水汚染物質の三次元動態把握を目的とし、地下水解析モデルを用いてシミュレーションを試みた。

## 2. 対象地域の概要

### (1) 対象地域の問題点

本対象地域は、自治体が平成2年度から実施している地下水のモニタリング結果より、汚染源の異なるトリクロロエチレン(以下、TCE)とテトラクロロエチレン(以下、PCE)等の揮発性有機塩素系化合物による汚染が判明した地域である。その後、汚染機構解明調査等が実施され、汚染範囲内に存在するA事業所とB事業所が特定はされていないが、汚染に深く関与しているものと推定されている。

### (2) 地形・地質・水文状況

対象地域は、標高200～250m付近に位置し、領域東側の山間部から西側の河川(K川)へ向かって比較的緩やかな斜面を有する地形を呈している。

地質的には、上層が粘土混じり砂礫層、下層が砂岩の2層で構成されている。また、地下水位は比較的浅く平均GL-2.0m程度であり、年間水位変動幅は+0.46m～-1.13mである。

図-1に対象地域における平成2年から平成9年までの月間降水量変化を示す。対象地域の平成2年から平成9年までの年間平均降水量は、2280mm/yearであり、国内における年間降水量の平均値が1800mm/yearであることを考慮すると、比較的降水量の多い地域であると言える。また、平成6年度は、記録的な渇水のため降水量が極端に少ない。

### (3) 地下水汚染状況

平成2年度の水質測定結果から、A事業所・B事業所の地下水流れ方向・下流側のほとんどの井戸においてTCE、PCEが検出されており、人の健康に関する地下水の環境基準値(TCE:0.03mg/l、PCE:0.01mg/l)を数十倍超過していることが判明し

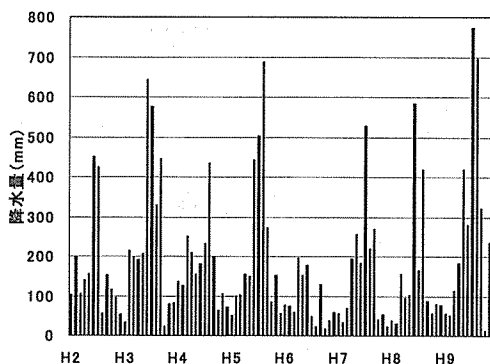


図-1 K地区の月間降水量変化

た。また、TCEの分解生成物である1,1,1-トリクロロエタン(以下、MC)が検出されたものの、全ての井戸で基準値以下であった。

汚染源は、これまでの調査によりおよそその場所の絞り込みはなされているものの、過去の漏出時期や漏出量とその形態に関しては明らかではない。

対象地域の井戸諸元調査等から、井戸水の使用目的の大半は雑用水であるが、過去に飲用目的に利用されていたことや対象地域の下流には清浄な河川が存在することなどからそれらへの影響も懸念される。

## 3. 地下水汚染解析

### (1) 基礎式

本解析で使用したモデルは、デンマーク水理研究所で開発されたMIKE SHEと呼ばれる地下水も含めた水文解析ソフトである。以下に、流れと物質輸送の基礎式を示す。

$$S \frac{\partial h}{\partial t} = \nabla(K \nabla h) \pm Q \quad (1)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -U \nabla C + \nabla(D \nabla C) \pm R \quad (2)$$

但し、 $S$ :貯留係数、 $h$ :水頭、 $K$ :透水係数テンソル、 $Q$ :湧き出し・吸い込み項、 $C$ :汚染物質濃度、 $U$ :流速ベクトル、 $D$ :分散係数テンソル、 $R$ :反応項

ここでは、分散係数テンソルは、平均間

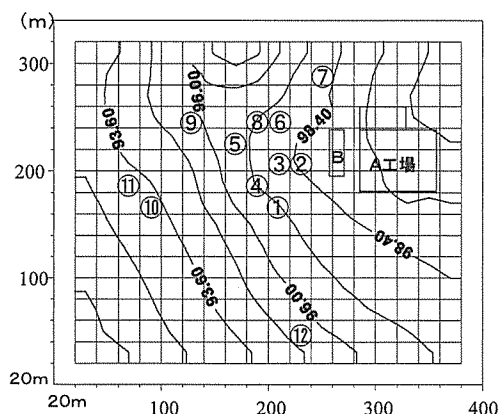


図-2 計算領域(水平分布)と初期水位(m)

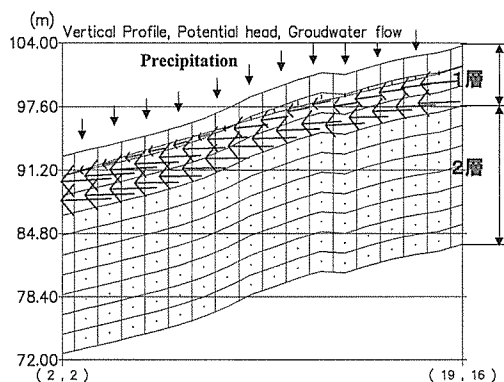


図-3 計算領域(鉛直分布)

隙流速と分散能係数の積で表される (Bear, 1972)<sup>3)</sup>。

## (2) 計算条件

図-2, 3に計算領域の水平方向, 鉛直方向条件を示す。領域設定は, 汚染調査結果を考慮して, 長さ400m×幅340m×深さ20mとし, 水平方向は20m, 鉛直方向は2mの計算メッシュとした。図中の番号は観測井戸を示す。涵養は実降水量を日単位で与え, 飽和帯には実降水量の25%が浸透するものとした。また, ボーリングデータ等を参考にして定めた地質, 水理パラメータを表-1に示す。対象物質は, 汚染源が異なると見られているTCE, PCEであり, 吸脱着, 揮散, 生物分解等の反応は考慮してい

表-1. 解析パラメータ

	1層目	2層目
透水係数 (m/s)	$1.0 \times 10^{-4}$	$1.0 \times 10^{-7}$
貯留係数 (l/m)	$5.0 \times 10^{-5}$	$1.0 \times 10^{-8}$
有効間隙率 (-)	0.3	0.03
縦分散能係数 (m)	1	0.1
横分散能係数 (m)	0.1	0.01

ない。汚染源は, これまでの表層汚染や聞き取り等の現地調査に基づく推定地点に設定し, 一定濃度として与えた。計算は, 実測値の存在する平成2年9月から平成9年12月までの8年間を計算刻み12時間で行った。

## (3) 結果と考察

### a) TCE 計算結果

図-4にそれぞれ平成9年2月と8月における計算層2 (深度2~4m) のTCE濃度の水平分布と, そのA-B断面におけるTCE濃度の鉛直分布を示す。図-4から, 移流分散により下流側に汚染プルームが広がっており, 岩盤層にまで浸透していることがわかる。また, 降水量の少ない渇水期にプルームが大きく広がっており, 逆に降水量の多い豊水期には希釈効果によりプルームが小さくなっていることがわかる。

図-5, 6に井戸No.1, 2におけるTCE濃度の経年変化を示す。これらから, 上述のように計算値は, 実測値の季節変動をよく再現している。井戸No.1においては, 平成6年度の渇水の影響もよく再現していることがわかる。しかしながら, H7年以降の実測値と計算値の相違は大きく, 汚染源と井戸との位置関係や特に汚染源近くの雨水浸透機構について検討の余地が残されている。また, 井戸No.2の結果からも, 渇水期にTCE濃度が上昇する傾向が再現され

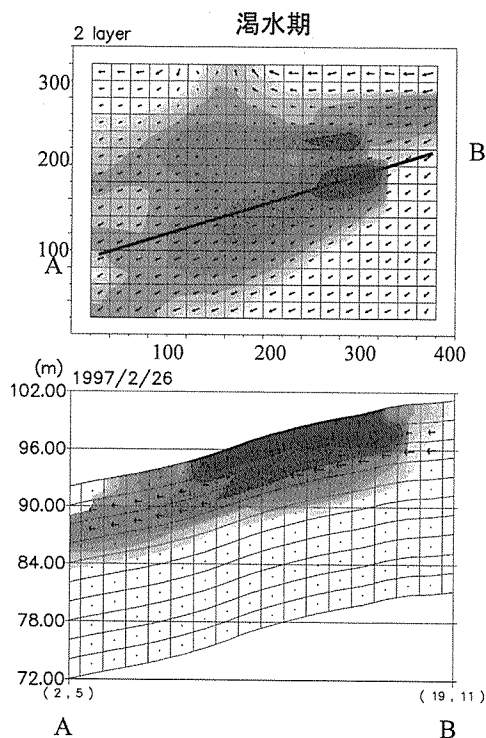


図-4 TCE の季節変動

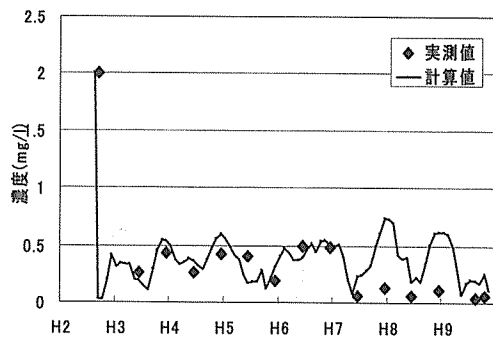


図-5 井戸No.1 の TCE 経年変化

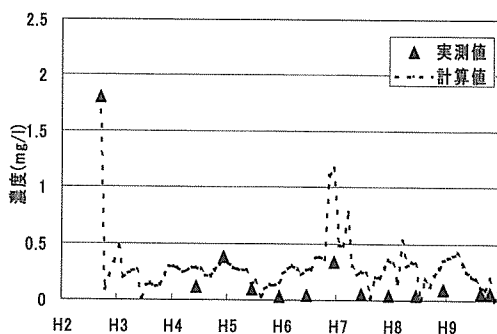


図-6 井戸No.2 の TCE 経年変化

ていることがわかるが、実測値よりも全体的に大きな計算結果となっている。このことは、井戸No.2 が汚染源に近い境界条件の影響を強く受けているためと考えられる。

図-7 に平成9年8月における各井戸の TCE 濃度の計算値と実測値の比較を示す。計算値は、実測値を空間的にもよく再現しており、環境基準値レベルでの再現性は検討の余地が残されているものの、空間的・時間的傾向はかなり良好な再現性を示した。

本解析では、実測値に基づき降水を日単位で再現したことにより、図-8 に示す降水を考慮しない場合と比較して実測値に近い計算結果を得ることが可能となった。

#### b) PCE 計算結果

図-9 は計算層2 (深度2～4 m) における PCE 濃度の水平分布と、その A-B 断面における PCE 濃度の鉛直分布を示して

1997/8/25, 計算層2

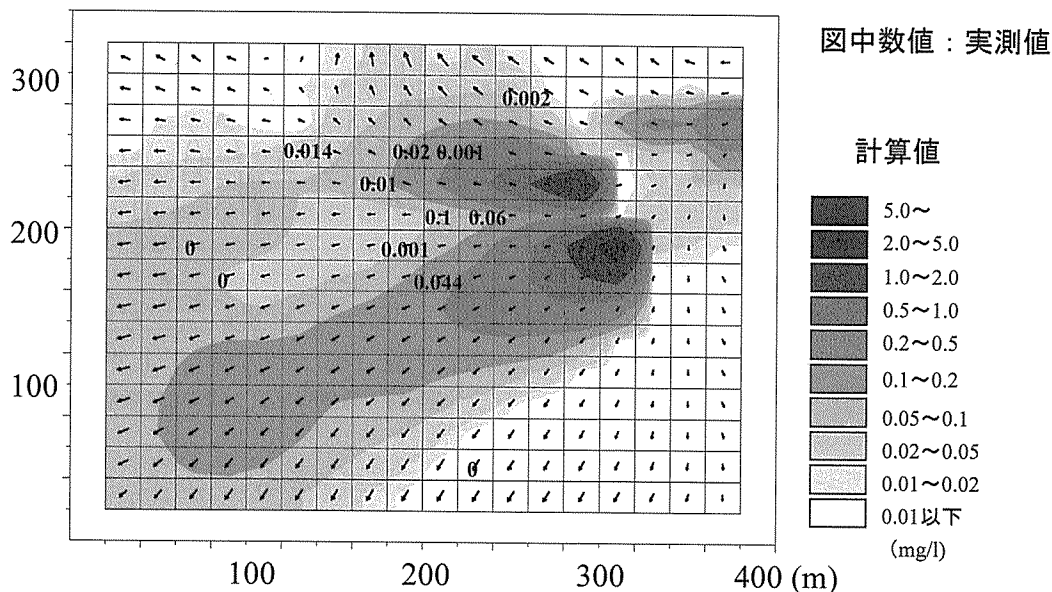


図-7 平成9年8月の各井戸におけるTCEの実測値と計算値の比較

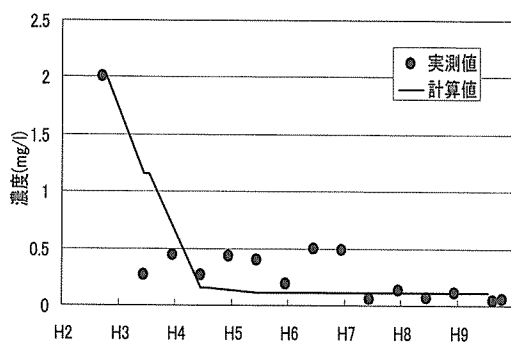


図-8 井戸No.1のTCE経年変化(無降水)

おり、TCE と同時期の平成9年2月と8月の計算結果を用いた。PCE も TCE の結果と同様に移流分散と希釈の影響が表れている。

図-10に井戸No.1, 2におけるPCE濃度の経年変化を示す。図から、PCEもTCEと同様の傾向を示しており、計算値は実測値を概ね再現していると言える。また、図-11に平成9年8月における各井戸のPCE濃度の計算値と実測値の比較を示す。図か

らPCEもTCE同様に空間的にも実測値が再現されていることがわかる。

#### 4. 結 論

以上の考察から、得られた知見を要約すると次のとおりである。

(1) 雨水の影響を考慮した汚染物質の挙動をシミュレーションした結果、計算結果は実測値の時間的、空間的傾向を良好に再現できた。

(2) 地下水中の汚染物質濃度は、降雨の変動により大きく変化するため、水質の調査に関しては、降雨データと共に短いタームで行なうことが重要であると言える。

(3) 汚染源及び濃度の異なるTCE及びPCEの計算値と実測値との一致が良好なことや、降雨に伴う季節変化が類似した傾向を示したこと等から、モデルの再現性が確認できた。

(4) TCE, PCEの環境基準値や水質管理というレベルからは、さらに解析の精度

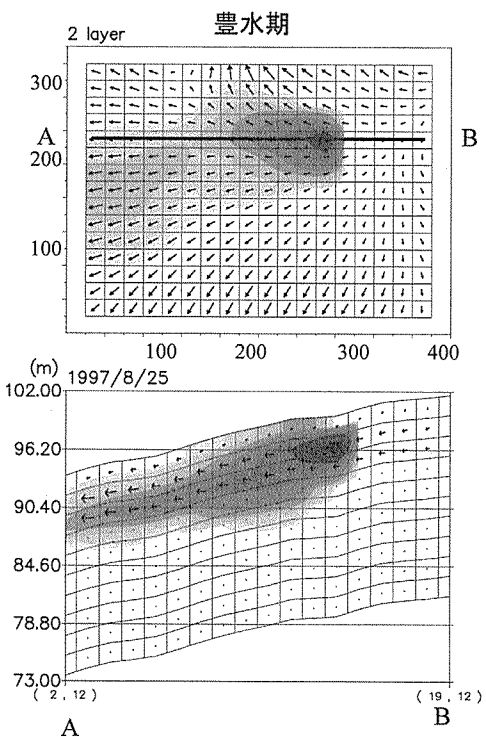
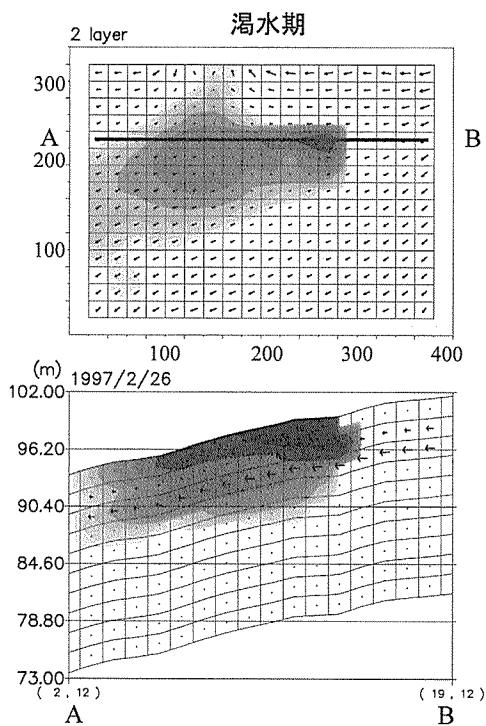


図-9 PCE の季節変動

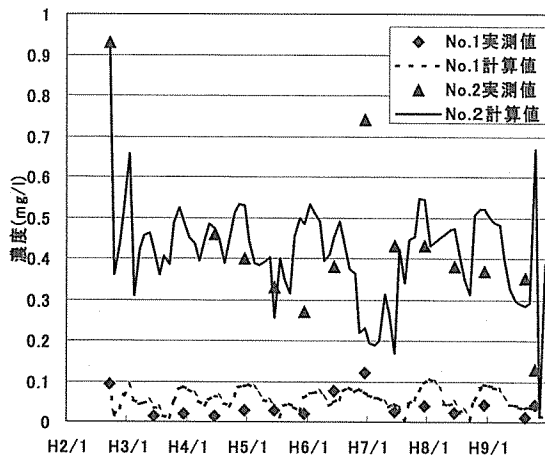


図-10 井戸No. 1, 2 の PCE 経年変化

を高める必要がある。

(5) 本研究では汚染源の濃度を一定としたが、実際には人為的もしくは自然的要因により汚染源濃度が変化したことも考えられ、地盤のパラメータの詳細な調査はすることながら、汚染物質の漏出量や形態等の詳細な調査に関しても精度を高めていくことも重要であると言える。

## 5. あとがき

地下水問題解決のためのモデルの開発を行った。本論文では、モデルの適用性を検討するために実測データが比較的揃っている中山間地を対象にシミュレーションを行った。今後は、汚染物質の反応を考慮に入れると共に沖積粘土層や低平地でのモデル化を進めていきたい。

## 謝 辞

本研究は、低平地防災研究センタープロジェクト研究経費の補助を受けて実施したものである。また、佐賀県環境保全課と佐賀大学、佐賀大学と(株)親和テクノとの共同研究の一部として実施した。ここに記して感謝の意を表します。

1997/8/25, 計算層2

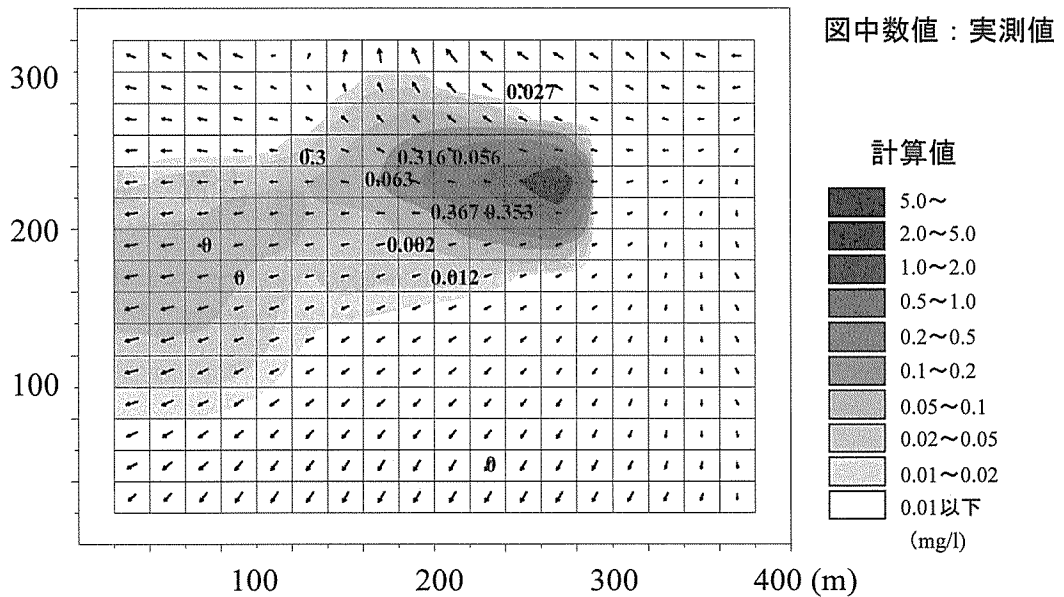


図-11 平成9年8月の各井戸におけるPCEの実測値と計算値の比較

#### 参考文献

- 1) 環境庁：環境白書 平成7年版, 平成8年版, 平成9年版.
- 2) 建設産業調査会：地下水ハンドブック, 1979.
- 3) Bear, J. and Verruijt, A. : Modelling Groundwater Flow and Pollution, 1987.
- 4) 環境技術研究協会：地下水・土壌汚染の現状と対策, 1995.
- 5) Anderson, M. P. and Woessner, W. W. : 地下水モデル—実践的シミュレーションの基礎—, 1992.
- 6) 水収支研究グループ：地下水資源・環境論—その理論と実践—, 1993.
- 7) 水収支研究グループ：地下水汚染論—その基礎と応用—, 1991.
- 8) DHI : MIKE SHE Technical Reference, User Guid.

## ■ 著者略歴



**吉田 愛**  
(よしだ あい)

1998年 佐賀大学理工学部建設工学科卒業  
1998年 株式会社親和テクノ



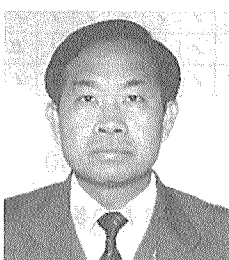
**古賀 憲一**  
(こが けんいち)

1976年 九州大学大学院工学研究科博士課程修了  
1990年 佐賀大学理工学部教授  
工学博士



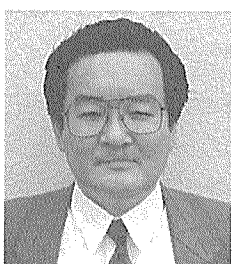
**池内 章雄**  
(いけうち あやお)

1999年 佐賀大学理工学部建設工学科卒業  
1999年 佐賀大学大学院工学系研究科  
博士前期課程



**W. Liengcharernsit**  
(ウィナイ)

1979年 アジア工科大学博士課程修了  
タイ・カセサート大学工学部助教授  
1995年 佐賀大学低平地防災研究センター  
外国人研究員（客員教授）  
Ph. D.



**荒木 宏之**  
(あらき ひろゆき)

1978年 佐賀大学大学院修士課程修了  
1991年 佐賀大学低平地防災研究センター助教授  
工学博士